



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

## **Практикум**

к выполнению лабораторных работ  
Э38, Э39.

«Изучение работы солнечных батарей»  
по дисциплине

## **«Физические основы электроники»**

Авторы  
Беликова Т. С.,  
Мардасова И. В.,  
Тимолянов К. А.,  
Шкиль Т. В.

Ростов-на-Дону, 2020

## Аннотация

Практикум содержит краткую теорию, описание рабочих установок и методику экспериментального определения ряда физических величин.

Предназначен для студентов инженерных направлений подготовки всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по данной теме.

## Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Беликова Т.С.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Мардасова И.В.,

к.т.н., доцент кафедры «Физика»  
Тимолянов К.А,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Шкиль Т.В



## Оглавление

<b>ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ.....</b>	<b>4</b>
Собственная и примесная проводимости полупроводников .....	4
<i>p-n</i> -переход и его свойства.....	8
Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость полупроводников .....	10
Вентильный фотоэффект .....	12
<b>Лабораторная работа Э38.....</b>	<b>19</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ.....	19
Описание экспериментальной установки .....	19
Порядок выполнения работы .....	19
Контрольные вопросы .....	22
<b>Лабораторная работа Э39.....</b>	<b>23</b>
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ .....	23
Краткая теория.....	23
Описание экспериментальной установки .....	23
Порядок выполнения работы .....	24
Контрольные вопросы .....	26
<b>Список литературы .....</b>	<b>26</b>

## ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

### Собственная и примесная проводимости полупроводников

Полупроводниками являются твердые тела, у которых при абсолютном нуле температур валентная зона полностью занята электронами и отделена от зоны проводимости сравнительно узкой ( $\Delta W < 1 \text{ эВ}$ ) запрещенной зоной.

Различают собственные и примесные полупроводники. Собственными являются химически чистые полупроводники, а их проводимость называется собственной проводимостью.

Типичными, наиболее широко распространенными собственными полупроводниками являются химические элементы германий и кремний. Внешние оболочки их атомов содержат по 4 валентных электрона, которые связаны с валентными электронами соседних атомов ковалентными связями.

На рис. 1 приведена упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле германия; каждая черточка означает связь, осуществляемую одним электроном. В идеальном кристалле при нуле Кельвина такая структура ведет себя как диэлектрик, поскольку все валентные электроны участвуют в образовании связей, и, следовательно, не могут участвовать в проводимости.

С повышением температуры тепловые колебания решетки приводят к разрыву некоторых валентных связей, часть электронов отщепляется от атомов, и они становятся свободными. В месте, покинутом электроном, возникает вакансия – дырка, которую могут заполнить электроны из соседней пары. Таким образом, дырка будет перемещаться по кристаллу, как и освободившийся электрон. В отсутствие электрического поля движение электронов проводимости и дырок является хаотическим. Если же кристалл поместить в электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, дырки – по полю, возникнет собственная проводимость германия, обусловленная как электронами, так и дырками.

Рассмотрим этот процесс на основе зонной теории. Согласно зонной теории, энергия  $\Delta W$ , необходимая для перехода электрона с верхнего уровня валентной зоны на нижний уровень зоны проводимости, называется *энергией активации* (рис. 2).

Переход электронов из заполненной валентной зоны в свободную зону создает в валентной зоне вакантные состояния – дырки (отмечены кружками на рис. 2). Такая дырка ведёт себя подобно частице с элементарным положительным зарядом. Под действием внешнего электрического поля одновременно с перемещением электронов вверх по энергетическим уровням зоны проводимости происходит заполнение вакантных состояний в валентной зоне электронами с нижележащих уровней этой зоны, эквивалентное перемещению положительных дырок вниз.

Таким образом, в полупроводниках можно говорить об электронном и дырочном типах проводимости, хотя оба они являются следствием перемещения электронов.

Проводимость собственных полупроводников, обусловленная движением электронов, называется электронной проводимостью или проводимостью *n*-типа (от лат. *negativus* – отрицательный).

Проводимость собственных полупроводников, обусловленная квази-частицами – дырками, называется дырочной проводимостью или проводимостью *p*-типа (от лат. *positivus* – положительный).

Таким образом, в собственных полупроводниках наблюдается два механизма проводимости – электронный и дырочный. При этом число электронов проводимости равно числу дырок в данном полупроводнике.

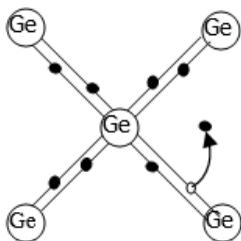


Рис. 1

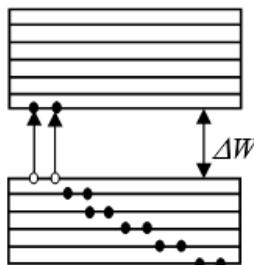


Рис. 2

Проводимость химически чистых полупроводников, обусловленная наличием в них электронов и дырок, называется *собственной* проводимостью, а сами полупроводники – собственными полупроводниками.

С повышением температуры количество электронов, преодолевших за счет энергии теплового движения запрещенную зону, растет, соответственно увеличивается и число дырок. Следовательно, с ростом температуры собственная проводимость полупроводников увеличивается, а сопротивление уменьшается по экспоненциальному закону:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}},$$

$$R = A e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость;  $\sigma_0$  и  $A$  – постоянные, характерные для данного полупроводника;  $\Delta W$  – энергия активации, равная ширине запрещенной зоны и различная для разных полупроводников;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана;  $R$  – сопротивление;  $T$  – температура в шкале Кельвин.

### Примесная проводимость полупроводников

Примесной проводимостью называется проводимость полупроводников, обусловленная наличием в них примесей, а сами полупроводники – примесными полупроводниками.

Необходимо различать донорные и акцепторные примеси. Примеси, у которых валентных электронов на единицу больше, чем у атомов основного вещества, называются донорными.

Рассмотрим механизм донорной примесной проводимости на примере германия. При замещении атома германия атомом, валентность которого на единицу больше, например, пятивалентным атомом мышьяка  $As$ , один из электронов атома мышьяка не может образовать ковалентной связи, он оказывается лишним и при тепловых колебаниях решетки может быть легко отщеплен от атома, т. е. стать свободным. При наложении электрического поля такие электроны начинают перемещаться по кристаллу, создавая электрический ток (рис. 3).

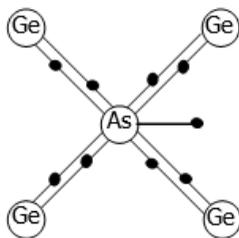


Рис. 3

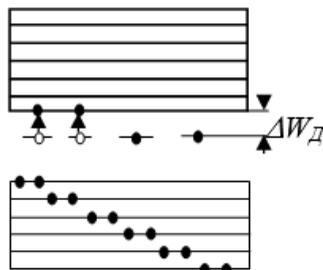


Рис. 4

С точки зрения зонной теории, рассмотренный процесс можно представить следующим образом. Введение донорной примеси искажает поле решетки и приводит к появлению дополнительных донорных уровней (рис. 4), которые располагаются в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости. Эти уровни заняты донорными электронами. При температуре, близкой к абсолютному нулю, энергия теплового движения недостаточна для того, чтобы перевести донорные электроны в зону проводимости, и полупроводник ведет себя как изолятор. При повышении температуры, воздействии света и т. д. электроны переходят с донорных уровней в зону проводимости и, при наличии разности потенциалов, обеспечивают ток.  $\Delta W_D$  – энергия активации донорной примеси.

Проводимость полупроводника, обусловленная наличием в нём электронов донорной примеси, называется электронной, донорной или *n*-типа, а сам полупроводник – *полупроводником n-типа*.

Примесь, у атомов которой не хватает достаточного количества электронов, чтобы заместить все валентные связи в решетке основного вещества, называется акцепторной.

При введении в решетку германия примесного атома с тремя валент-

ными электронами, например, бора  $B$ , для образования связей с четырьмя ближайшими соседними атомами германия у атома бора не хватает одного электрона, одна из связей остается неуплотненной, поэтому четвертый электрон может быть захвачен от соседнего атома германия, где, соответственно, возникает дырка (рис. 5). Происходящее затем последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в противоположную сторону, т. е. дырки перемещаются в решетке германия как свободные положительные заряды.

При введении в полупроводник акцепторной примеси свободные примесные уровни располагаются в запрещенной зоне вблизи верхней границы валентной зоны (рис. 6). Под действием очень малой энергии теплового возбуждения атом примеси может отнять электрон у одного из своих ближайших соседей. Это означает, что часть электронов из валентной зоны уже при небольших температурах переходит на акцепторные уровни, а в валентной зоне появляются свободные дырки. В этом случае полупроводник приобретает дырочную проводимость или проводимость  $p$ -типа, и называется *полупроводником  $p$ -типа*.  $\Delta W_A$  – энергия активации акцепторной примеси.

Для перехода с донорного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на акцепторный уровень (рис. 4, 6) требуется меньшая энергия, чем для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому при низких температурах основную роль играет примесная проводимость.

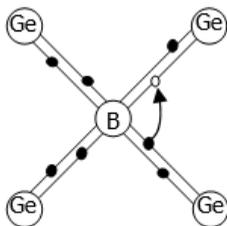


Рис. 5

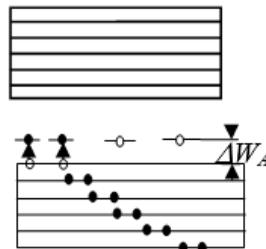


Рис. 6

С ростом температуры в электронном полупроводнике, кроме свободных электронов, появляется некоторое количество свободных дырок, а в дырочном полупроводнике появляется некоторое количество свободных электронов. Носители заряда, число которых преобладает в кристалле, называются основными носителями; носители противоположного знака называются неосновными. В полупроводниках с донорной примесью основными носителями являются электроны, неосновными – дырки. В полупроводниках с акцепторной примесью основными носителями являются дырки, а неосновными – электроны. Причиной появления неосновных носителей является собственная проводимость.

Введение в кристаллическую решетку полупроводников примесей приводит к появлению в них ценных для практического использования

ния свойств: резкого повышение электропроводности, фотопроводности, люминесценции и т. п. Полупроводники используются в электро- и радиотехнической аппаратуре (кристаллические диоды и триоды), служат выпрямителями (селеновые, купроксные). Из полупроводников изготавливают полупроводниковые сопротивления (термисторы, фотосопротивления), источники света (светодиоды, лазеры), источники э.д.с. (солнечные батареи) и др. Полупроводниковые приборы малогабаритны, что является их важным достоинством.

### ***p-n-переход и его свойства***

*Электронно-дырочным переходом (p-n-переходом)* называется граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную проводимость. Переход нельзя осуществить просто механическим соединением двух полупроводников: области различной проводимости создают либо при выращивании кристаллов, либо при соответствующей обработке кристаллов.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в *p-n-переходе*. Если донорный полупроводник (*n*-типа) приводится в контакт с акцепторным полупроводником (*p*-типа), то электроны из *n*-полупроводника будут диффундировать в *p*-полупроводник, где их концентрация ниже. В обратном направлении происходит диффузия дырок. Вследствие этого из-за ухода электронов в *n*-полупроводнике вблизи границы остаётся нескомпенсированный положительный объёмный заряд неподвижных ионов (ионизированных донорных атомов), а в *p*-полупроводнике, из-за ухода дырок, вблизи границы образуется отрицательный объёмный заряд неподвижных отрицательных ионов (ионизированных акцепторных атомов). Объёмные заряды противоположных знаков образуют у границы двойной электрический слой (рис. 7, а). Электрическое поле  $\vec{E}_{\text{конт.}}$  направлено от *n*-области к *p*-области, препятствует дальнейшему переходу электронов в направлении *n*→*p* и дырок в направлении *p*→*n*. Если концентрации донорной и акцепторной примесей в полупроводниках одинаковы, то толщина слоев  $d_1$  и  $d_2$ , равны,  $d_1 = d_2$ . Толщина  $d$  слоя *p-n*-перехода в полупроводниках составляет примерно  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м.

С помощью внешнего электрического поля сопротивление запертого слоя можно изменить. Когда приложенное к *p-n-переходу* внешнее электрическое поле направлено от *n*- к *p*-полупроводнику (рис. 7, б), оно вызывает движение основных носителей от границы *p-n-перехода* в противоположные стороны, запирающий слой расширяется и его сопротивление возрастает. Такое направление внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называется запирающим (обратным). В этом направлении электрический ток через *p-n-переход* очень мал, так как образуется лишь за счёт неосновных носителей (электронов в *p*-полупроводнике и дырок в *n*-полупроводнике). Постоянный при данной температуре электрический ток, обусловленный неосновными носителя-

ми, называется *током насыщения* или обратным током  $p$ - $n$ -перехода  $I_{0S}$  (левая ветвь рис. 8).

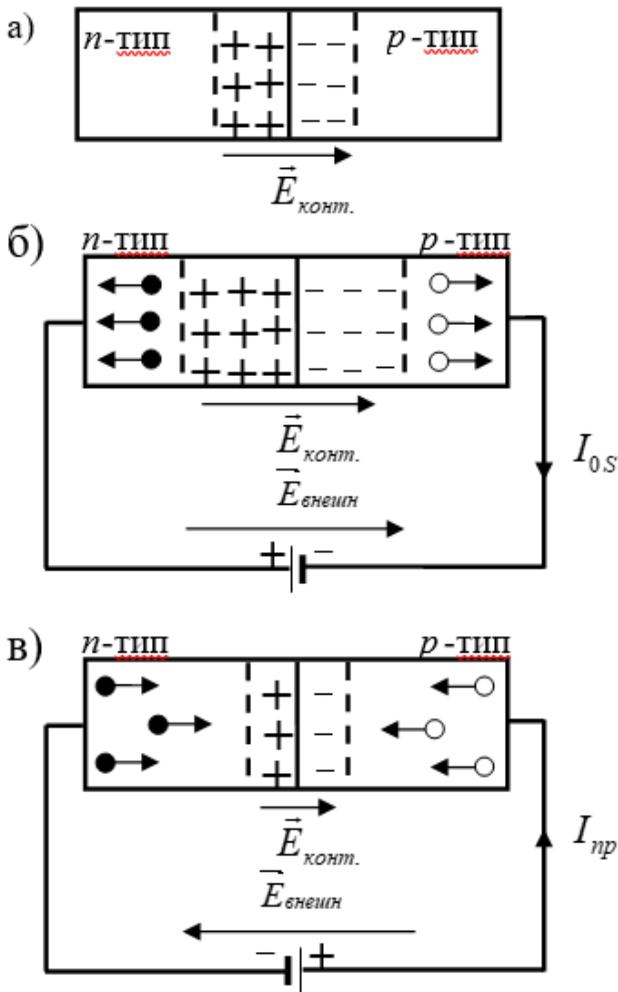


Рис. 7

Если источник внешнего напряжения подключен плюсом к  $p$ -области, а минусом к  $n$ -области, то такое подключение называется *прямым*. При этом внешнее электрическое поле направлено противоположно полю контактного слоя (рис. 7, в) и вызывает движение электронов в  $n$ -полупроводнике и дырок в  $p$ -полупроводнике навстречу друг другу к границе  $p$ - $n$ -перехода, где они рекомбинируют; толщина контактного слоя

и его сопротивление уменьшаются. Ток основных носителей, протекающий через полупроводник при прямом подключении  $p$ - $n$ -перехода, называется *прямым током*  $p$ - $n$ -перехода (правая ветвь рис. 8).



Рис. 8

Величина прямого тока связана с приложенным к  $p$ - $n$ -переходу напряжением  $U$  экспоненциальной зависимостью  $I_{np} = I_{os} e^{\frac{eU}{kT}}$ , где в показателе экспоненты  $e$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Так как прямой и обратный токи протекают в противоположных направлениях, то полный ток  $p$ - $n$ -перехода будет равен их разности:

$$I = I_{np} - I_{os} = I_{os} (e^{\frac{eU}{kT}} - 1).$$

Кривая зависимости тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход, от величины прикладываемого напряжения называется *вольтамперной характеристикой*  $p$ - $n$ -перехода (рис. 8).

Выражение для полного тока и рис. 8 соответствуют идеализированному  $p$ - $n$ -переходу.

Вольтамперные характеристики  $p$ - $n$ -переходов в реальных случаях несколько отличаются от расчётных. Так, при достаточно больших обратных напряжениях наблюдается явление пробоя  $p$ - $n$ -перехода. Свободные электроны и дырки, ускоряясь в электрическом поле, накапливают кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов кристаллической решетки полупроводника. Образовавшиеся при этом электроны сами принимают участие в дальнейшей ионизации. Происходит лавинное "размножение" носителей в области  $p$ - $n$ -перехода, и ток резко возрастает. Для каждого  $p$ - $n$ -перехода существует предельное значение обратного напряжения, выше которого возникает пробой перехода.

## Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость полупроводников

Электропроводность полупроводников может возрастать под действием электромагнитного излучения за счёт внутреннего фотоэффекта.

Внутренний фотоэффект – это переходы электронов внутри полупроводника из связанных состояний в свободные под действие света. В результате таких переходов концентрация носителей тока в полупроводнике увеличивается, что приводит к увеличению проводимости полупро-

водника.

Такая дополнительная проводимость, обусловленная действием фотонов, получила название фотопроводимости. Фотопроводимость – это увеличение электропроводности полупроводника под действием света.

Рассмотрим механизм этого явления.

Если на полупроводник воздействовать светом с частотой  $\nu$ , энергия квантов которого  $h\nu$  ( $h$  – постоянная Планка) больше или равна ширине запрещённой зоны полупроводника  $\Delta W$  ( $h\nu \geq \Delta W$ ), то за счёт энергии кванта электрон перейдёт в зону проводимости (рис. 9, а), а на его месте возникнет дырка. В результате появляется дополнительная пара носителей тока – электрон и дырка, что проявляется в увеличении электропроводности вещества.

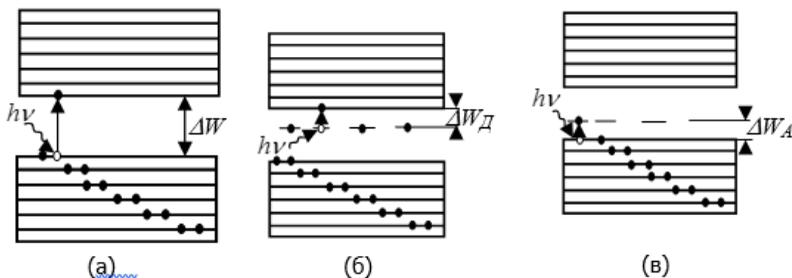


Рис. 9

Таким образом, под действием излучения происходит генерация пар носителей заряда – электронов и дырок (так называемых фотоэлектронов и фотодырок), возникает собственная фотопроводимость, обусловленная как электронами, так и дырками.

Если полупроводник содержит примеси, то фотопроводимость может возникнуть, когда энергия квантов больше или равна энергии активации донорной ( $h\nu \geq \Delta W_{д}$ ) или акцепторной примесей ( $h\nu \geq \Delta W_{А}$ ). В

первом случае электрон перейдёт с донорного уровня в зону проводимости (рис. 9, б), а во втором – из валентной зоны на уровень акцепторной примеси (рис. 9, в). В результате возникает примесная фотопроводимость, являющаяся чисто электронной для полупроводника  $n$ -типа и чисто дырочной для полупроводника  $p$ -типа.

Минимальная частота излучения  $\nu_0$ , при которой возникает внутренний фотоэффект, называется красной границей фотопроводимости.

Для собственных полупроводников

$$\nu_0 = \frac{\Delta W}{h},$$

для примесных полупроводников

$$v_0 = \frac{\Delta W_D}{h}, \quad v_0 = \frac{\Delta W_A}{h}.$$

Учитывая значения  $\Delta W$ ,  $\Delta W_D$  и  $\Delta W_A$  для конкретных полупроводников, можно показать, что красная граница фотопроводимости для собственных полупроводников приходится на видимую область спектра, для примесных – на инфракрасную.

## Вентильный фотоэффект

*p-n*-переход может служить источником эдс, преобразующим лучистую энергию в электрическую.

Вентильный фотоэффект – это явление возникновения электродвижущей силы (фото-эдс) при действии света на *p-n*-переход или на контакт полупроводник-металл.

Вентильный фотоэффект позволяет осуществлять непосредственное превращение лучистой энергии в электрическую.

Полупроводниковые приборы, основанные на вентильном фотоэффекте, в которых световая энергия превращается в электрическую, называются фотоэлементами. Они работают без источника внешнего напряжения и создают собственную эдс под действием излучения.

Помимо использования фотоэлементов в качестве фотопреобразователей, их применяют как чувствительные датчики, реагирующие на изменение интенсивности светового потока, для контроля управления и автоматизации на производстве, для сигнализации и локации невидимых излучений в системах охраны, в технике звукового кино и системах связи.

Максимальный КПД фотоэлемента возможен только в случае собственной фотопроводимости.

Основу вентильного фотоэффекта составляют два явления: внутренний фотоэффект и пространственное разделение возбуждённых светом фотоэлектронов и фотодырок.

Рассмотрим механизм возникновения фото-эдс. При воздействии на *p-n*-переход светом, энергия квантов которого больше или равна ширине запрещенной зоны полупроводника  $\Delta W$ , возникает фотоэффект: электроны за счет энергии квантов  $h\nu$  переходят в зону проводимости (рис. 9, а), на их месте возникают дырки, т.е. под действием излучения в *n*- и *p*-областях происходит генерация пар носителей заряда – электронов и дырок. Образовавшиеся носители участвуют в тепловом движении и перемещаются в различных направлениях, в том числе и к *p-n*-переходу, который выполняет функцию своеобразного фильтра. Возникшие фотоэлектроны и фотодырки, перемещающиеся к переходу, попадают под действие электрического поля запирающего слоя *p-n*-перехода  $\vec{E}_{\text{конт}}$ , которое препятствует перемещению основных носителей заряда (рис. 7, а). Для неосновных носителей, например, для электронов, возникших в *p*-области, поле перехода является ускоряющим. Оно перебрасывает электроны в *n*-область (рис. 10). Аналогично дырки перебрасы-

ваются полем из  $n$ -области в  $p$ -область. А для основных носителей, например, дырок в  $p$ -области, поле перехода является тормозящим, и эти носители остаются в своей области, т.е. дырки остаются в  $p$ -области, а электроны – в  $n$ -области. Разделение возбужденных светом носителей под действием поля  $p$ - $n$ -перехода показано на рис. 10.

В результате такого процесса в  $n$ - и  $p$ -областях накапливаются избыточные основные носители,  $n$ -область заряжается отрицательно, а  $p$ -область – положительно; между контактами 1 и 2 возникает разность потенциалов, которую называют фото-эдс. С увеличением светового потока  $\Phi$  фото-эдс  $\mathcal{E}$  растет по нелинейному закону (рис. 11). Значение эдс может достигать нескольких десятых долей вольта.

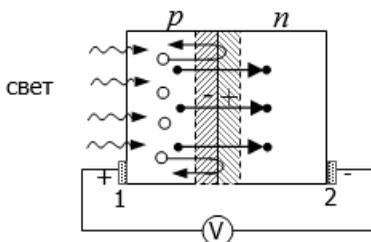


Рис. 10

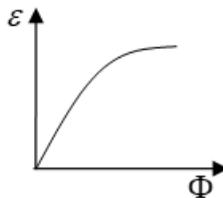


Рис. 11

Явление возникновения под действием электромагнитного излучения электродвижущей силы между двумя областями полупроводника с различным типом проводимости, разделенными  $p$ - $n$ -переходом, называется *вентильным фотоэффектом*.

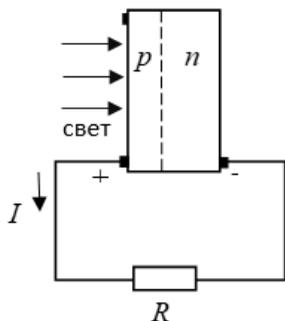


Рис. 12

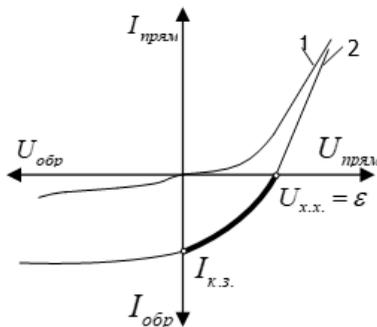


Рис. 13

Рассмотрим  $p$ - $n$  – переход в отсутствии света и внешнего напряжения (рис. 7а), т.е. в состоянии равновесия. Через переход протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: основных носителей и неосновных носителей; суммарный ток через

переход равен нулю.

При освещении  $p$ - $n$ -перехода за счет генерации пар дополнительных носителей заряда между внешними контактами возникает разность потенциалов  $U_{xx}$ , называемая напряжением холостого хода.

При замыкании цепи (рис. 12) на нагрузочном сопротивлении  $R$  появится напряжение, а через переход будут протекать три тока: ток основных носителей  $I_{os} e^{\frac{eU}{kT}}$ , ток неосновных носителей  $I_{os}$  и фототок  $I_{\phi}$ . Фототок обусловлен движением неосновных носителей – фотоэлектронов и фотодырок, возникших в полупроводнике под действием света.

Полный ток  $I$  через  $p$ - $n$ -переход (т.е. в цепи) равен сумме всех трёх токов.

Поскольку токи  $I_{os}$  и  $I_{\phi}$  направлены противоположно току основных носителей,

$$I = I_{os} e^{\frac{eU}{kT}} - I_{os} - I_{\phi}. \quad (1)$$

Этот ток течет через нагрузку  $R$ , на которой выделяется электрическая энергия. Таким образом  $p$ - $n$ -переход становится источником тока, в котором световая энергия преобразуется в электрическую.

Из выражения (1) следует:

$$\frac{I + I_{\phi}}{I_{os}} + 1 = e^{\frac{eU}{kT}}.$$

Прологарифмируем полученное уравнение и выразим величину  $U$ :

$$\ln\left(\frac{I + I_{\phi}}{I_{os}} + 1\right) = \frac{eU}{kT} \Rightarrow U = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I + I_{\phi}}{I_{os}} + 1\right). \quad (2)$$

Проанализируем полученное выражение. Фототок  $I_{\phi}$  пропорционален световому потоку  $\Phi$ , подающему на фотоэлемент:

$$I_{\phi} = \alpha \Phi, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности.

Ток  $I$  зависит от  $I_{\phi}$  и сопротивления нагрузки  $R$ . Если внешняя цепь разомкнута (при  $R \rightarrow \infty$ ),  $I = 0$ . Существующее в этот момент на контактах фотоэлемента напряжение называется напряжением холостого хода, обозначается  $U_{xx}$  и фактически представляет собой фото-эдс,

$U_{xx} = \mathcal{E}$ . Как следует из формулы (2),

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_{os}} + 1\right). \quad (4)$$

В соответствии с (4) и (3) фото-эдс  $\mathcal{E} = U_{xx}$  логарифмически (т.е. слабо) растет с увеличением фототока  $I_{\phi}$  (и светового потока  $\Phi$ , рис. 11).

При коротком замыкании, когда  $R = 0$ , все генерированные светом носители сразу поступают во внешнюю цепь, не накапливаясь на контактах фотоэлемента, т.е.  $U = 0$ . Ток короткого замыкания, текущий при этом в цепи, согласно (1), равен:

$$I_{к.з.} = I_{os}(e^0 - 1) - I_{\phi} = I_{os}(1 - 1) - I_{\phi} = -I_{\phi}, \quad (5)$$

т.е. численно равен фототоку.

На рис. 13 представлены две вольтамперные характеристики  $p$ - $n$ -перехода: кривая 1 – для неосвещенного  $p$ - $n$ -перехода (темновая), кривая 2 – для освещенного перехода; рабочий режим фотоэлемента соответствует выделенному участку кривой 2.

Выделенный участок представляет собой вольтамперную характеристику фотоэлемента, которую можно получить экспериментально, изменяя значение  $R$  от нуля до бесконечности.

Вольтамперные характеристики идеального фотоэлемента при различных световых потоках ( $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ ) показаны на рис. 14.

Принципиальная схема фотоэлемента приведена на рис. 15.

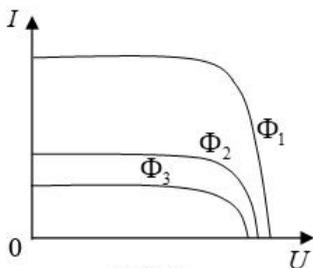


Рис. 14

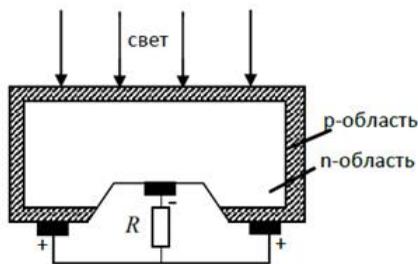


Рис. 15

В настоящее время важное значение имеют кремниевые фотоэлементы, используемые в качестве солнечных преобразователей (солнечных элементов). Они преобразуют энергию солнечных лучей в электрическую, и ЭДС их достигает 0,5 В. Из таких элементов путем последовательного и параллельного соединений создаются солнечные батареи, которые обладают сравнительно высоким КПД (до 20%) и могут развивать мощность до нескольких киловатт.

Элемент солнечной батареи представляет собой пластинку крем-

ния  $n$ -типа, окружённую тонким слоем кремния  $p$ -типа толщиной около одного микрона с контактами для присоединения к внешней цепи.

Солнечная батарея – это устройство, непосредственно преобразующее энергию солнечного света в электрическую энергию. Для того, чтобы использовать полученную электрическую энергию, в цепь батареи необходимо включить нагрузочное сопротивление  $R$ , на котором будет выделяться полезная мощность

$$P = IU = \frac{U^2}{R}, \quad (6)$$

где  $I$  – сила тока в цепи солнечной батареи;  $U = IR$  – падение напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R$ .

Согласно закону Ома,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (7)$$

где  $I$  – сила тока,  $R$  – сопротивление нагрузки,  $r$  – внутреннее сопротивление батареи.

В режиме короткого замыкания, когда сопротивление нагрузки равно нулю ( $R = 0$ ), все создаваемое напряжение падает на внутреннем сопротивлении. При этом через батарею течет максимально возможный ток короткого замыкания

$$I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Как видно из формул (6) и (7), при постоянном световом потоке значения  $I$ ,  $U$  и  $P$  определяются величиной сопротивления нагрузки  $R$ .

На практике нагрузочное сопротивление подбирается таким образом, чтобы выделяемая на нем мощность достигала максимального значения  $P_m$ . При этом коэффициент полезного действия (КПД) солнечной батареи имеет максимальное (для данного светового потока) значение, а нагрузочное сопротивление называется оптимальным и обозначается  $R_{opt}$ .

Как показывают теоретические расчеты, полезная мощность  $P$  максимальна, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению батареи,  $R = r$ . Докажем это.

Полезная мощность, т.е. мощность, расходуемая на нагрузке

$$P = UI = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (8)$$

Поскольку для данного светового потока значения  $\mathcal{E}$  и  $r$  солнечной батареи являются постоянными величинами,  $P$  является функцией внешнего сопротивления,  $P = f(R)$ .

Для выяснения условия, при котором  $P$  будет максимальной, исследуем

## Физика

дугем функцию (8) на экстремум:

$$\frac{dP}{dR} = 0.$$

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\varepsilon^2(R+r-2R)}{(R+r)^3},$$

$$R+r-2R=0 \Rightarrow R=r, \quad (9)$$

т. е. полезная мощность  $P$  максимальна, если внешнее сопротивление равно внутреннему сопротивлению солнечной батареи:  $P = P_m$ , если  $R = R_{omn} = r$ .

Коэффициент полезного действия  $\eta$  солнечной батареи равен отношению максимальной полезной мощности  $P_m$  к падающему световому потоку.

Световой поток определяется как мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению (по его действию на селективный приёмник света с заданной спектральной чувствительностью); измеряется в люменах (лм).

Освещённость  $E$  равна отношению светового потока  $\Phi$ , падающего на поверхность, к площади  $S$  этой поверхности:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (10)$$

Освещённость измеряется в люксах (лк). 1 лк – освещённость поверхности, на 1 м<sup>2</sup> которой падает световой поток в 1 лм: 1 лк=1 лм/м<sup>2</sup>.

Если свет падает перпендикулярно освещаемой поверхности, освещённость, создаваемая точечным источником, выражается формулой

$$E = \frac{J}{r^2}, \quad (11)$$

где  $J$  – сила света источника, измеряемая в канделах (кд);  $r$  – расстояние между источником и поверхностью.

Таким образом, световой поток  $\Phi$ , падающий на поверхность  $S$ , равен произведению освещённости и площади этой поверхности:

$$\Phi = E \cdot S. \quad (12)$$

Световой поток  $\Phi$  определяется как мощность оптического излучения. Опытным путем было установлено, что световому потоку 1 лм, образованному излучением с длиной волны  $\lambda = 555 \text{ нм}$ , соответствует поток энергии в 0,0016 Вт. Величина  $A = 0,0016 \text{ Вт/лм}$  называется механическим эквивалентом света. Для того, чтобы  $\Phi$ , выраженный в люменах, выразить в ваттах, его необходимо умножить на величину  $A$ .

Согласно определению  $\eta$ ,

## Физика

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi \cdot A} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Многие процессы уменьшают КПД; отметим некоторые из них:

- свет частично отражается от поверхности, поэтому для уменьшения отражения солнечные элементы покрывают интерференционным просветляющим слоем;
- фотоны, энергия которых недостаточна для внутреннего фотоэффекта, не дают вклада в электрическую энергию;
- часть генерированных под действием света пар электрон-дырка рекомбинируют, не участвуя в фототоке;
- часть мощности теряется при прохождении тока через полупроводник за счет его собственного сопротивления.

Согласно теории, солнечные батареи на основе кремния имеют  $\eta$  не более 20%, а на практике менее 10%.

Солнечные батареи из кремниевых фотоэлементов – это основные источники питания на искусственных спутниках Земли, космических кораблях, автоматических метеостанциях и др. Солнечные батареи располагаются на приборно-агрегатном отсеке космического корабля в виде крыльев, разворачиваемых во время орбитального полёта. Практическое применение солнечных батарей непрерывно расширяется.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭЗ8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

**Цель работы:** исследование вольтамперных характеристик солнечной батареи, зависимости фото-эдс и фототока от светового потока.

**Оборудование:** солнечная батарея (СБ), люксметр, нагрузочное сопротивление  $R$  (магазин сопротивлений), вольтметр  $V$ , осветительная лампа, ЛАТР (лабораторный автотрансформатор регулируемый).

#### Описание экспериментальной установки

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

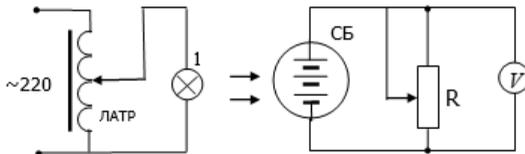


Рис. 1

Исследуемую солнечную батарею (СБ) рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы она была полностью равномерно освещена светом. Батарея освещается лампой 1; напряжение на лампе изменяется с помощью ЛАТРа, подключенного к сети. С ростом напряжения увеличивается мощность лампы и освещенность  $E$  солнечной батареи (т.е. световой поток  $\Phi$ ); площадь светопоглощающего слоя батареи  $S = 0,16 \text{ м}^2$ . Освещенность определяется с помощью люксметра, укрепленного в центре батареи. В качестве нагрузки  $R$  используется магазин сопротивлений; падение напряжения на нагрузке измеряют вольтметром  $V$  с пределом измерения 20 В (постоянного тока). Гнезда вольтметра «com» и «V» соединяются соответственно с клеммами «0» и «max» магазина сопротивлений.

#### Порядок выполнения работы

1. Плоскость солнечной батареи (СБ) должна быть расположена вертикально.

Установить лампу на расстоянии не менее  $\ell \approx 0,6 \text{ м}$  от СБ таким образом, чтобы свет падал перпендикулярно поверхности батареи, а центр лампы находился на одном горизонтальном уровне с центром батареи. При этом поверхность СБ освещается достаточно равномерно.

- Укрепить люксметр в центре СБ.
2. Подключить ЛАТР к сети, включить лампу.
  3. Записать в табл. 1 рекомендуемые значения освещенности  $E$ : для СБ М30 – 1700 лк, 1300 лк, 900 лк.
  4. Рассчитать и занести в таблицы 1 и 2 соответствующие значения  $\Phi = ES$ ,  $S = 0,16 м^2$ .
  5. Изменяя с помощью ЛАТРа напряжение на лампе, установить первое из рекомендуемых значений освещенности.

**Таблица 1**

№	$E$ , лк	$\Phi$ , лм	$\varepsilon$ , В	$I_{к.э.э}$ , А	$r$ , Ом	$\alpha$ , А/лм	$\Delta\alpha$ , А/лм	$\delta\alpha$ , %
1								X
2								
3								
Среднее значение								

6. Вращением декадных рукояток установить на магазине сопротивлений нагрузочное сопротивление  $R$ , при котором  $U_1 = 2B$ ; увеличивать напряжение с шагом 2 В.

Увеличивая сопротивление  $R$ , заносить соответствующие значения  $R$  и  $U$  в табл. 3. Последнее значение  $R$  должно быть равно 99900 Ом ( $R = \infty$ ).

7. Повторить п. 6 для двух других значений освещенности из табл. 1.
8. Выключить установку.

**Задание 1.** Исследование вольтамперных характеристик солнечной батареи

1. Для каждого светового потока  $\Phi$  рассчитать и занести в табл. 2 значения тока:  $I = \frac{U}{R}$ .

Таблица 2

$\Phi, \text{лм}$	№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
	$R, \text{Ом}$								$\infty$
	$U, \text{В}$								
	$I, \text{А}$								
	$R, \text{Ом}$								$\infty$
	$U, \text{В}$								
	$I, \text{А}$								
	$R, \text{Ом}$								$\infty$
	$U, \text{В}$								
	$I, \text{А}$								

2. По данным табл. 2 на одних координатных осях построить вольт-амперные характеристики батареи  $I = f(U)$  для трех значений светового потока  $\Phi$ .

3. По графику для каждого значения  $\Phi$  определить и записать в табл. 1 значение фото-эдс ( $\varepsilon = U_{x.x.}$ ) и ток короткого замыкания  $I_{к.з.}$ ; рассчитать и занести в табл. 1 значения внутреннего сопротивления батареи  $r$ :

$$r = \frac{\varepsilon}{I_{к.з.}}$$

4. По данным табл. 1 построить график зависимости  $\varepsilon = f(\Phi)$ , сравнить его с рисунком 11 (см. раздел «Вентильный фотоэффект»).

5. Из анализа табл. 1 сделать вывод о зависимости  $\varepsilon$ ,  $I_{к.з.}$  и  $r$  от светового потока.

### Задание 2. Исследование зависимости фототока от светового потока

Согласно теории (см. формулу (5)),  $I_{к.з.} = I_{\phi}$ .

1. По данным табл. 1 построить график зависимости  $I_{к.з.} = f(\Phi)$  (т.е. график  $I_{\phi} = f(\Phi)$ ).

2. Сравнить полученный график на соответствие формуле (3).

3. По данным табл. 1 рассчитать коэффициент пропорциональности

$$\alpha = \frac{I_{к.з.}}{\Phi},$$

его среднее значение и погрешности:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3}, \quad \Delta \alpha_i = |\langle \alpha \rangle - \alpha_i|,$$

$$\langle \Delta \alpha \rangle = \frac{\Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2 + \Delta \alpha_3}{3}, \quad \delta \alpha = \frac{\langle \Delta \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle} \cdot 100\% .$$

4. Записать окончательный результат в виде  $\alpha = \langle \alpha \rangle \pm \langle \Delta \alpha \rangle$ .

### Примечание

При исследовании СБ Р30 E=2000 лк, 1300 лк, 1000 лк; напряжение U изменяется от 1В с шагом 1В.

## Контрольные вопросы

1. Что представляет собой *p-n*-переход?
2. Объясните и проиллюстрируйте рисунком образование запиорного слоя *p-n*-перехода. Что представляют собой запиорный слой?
3. Что такое прямой ток *p-n*-перехода? Обратный?
4. Начертите вольтамперную характеристику *p-n*-перехода.
5. Что такое внутренний фотоэффект? Поясните механизм его возникновения с помощью рисунков.
6. Что такое фотопроводимость?
7. Что представляет собой красная граница фотопроводимости? Какой формулой она определяется для собственных и примесных полупроводников?
8. Что такое вентильный фотоэффект?
9. Что такое фото-эдс? Какие носители ее обеспечивают?
10. Движением каких носителей обусловлен фототок?
11. Как зависит фото-эдс от светового потока? Изобразите эту зависимость графически.
12. Что такое полупроводниковый фотоэлемент?
13. Что представляет собой солнечная батарея?
14. Изобразите вольтамперную характеристику солнечной батареи. Укажите на ней точки, соответствующие току короткого замыкания и фото-эдс.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭЗ9

### ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

**Цель работы:** определение оптимального сопротивления нагрузки, фото-эдс, внутреннего сопротивления и КПД солнечной батареи.

**Оборудование:** солнечная батарея (СБ), люксметр, нагрузочное сопротивление  $R$  (магазин сопротивлений), вольтметр  $V$ , осветительная лампа, ЛАТР (лабораторный автотрансформатор регулируемый).

#### Краткая теория

Сила тока  $I$ , согласно закону Ома, равна отношению напряжения  $U$  к сопротивлению нагрузки:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow U = IR. \quad (1)$$

С другой стороны,

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - фото-эдс,  $r$  - внутреннее сопротивление солнечной батареи.

Выразив значения тока при двух различных сопротивлениях нагрузки  $R_m$ ,  $R_n$  и проделав математические преобразования, получим выражения для  $r$  и  $\varepsilon$ .

$$I_m = \frac{\varepsilon}{R_m + r} \Rightarrow I_m R_m + I_m r = \varepsilon, \quad U_m + I_m r = \varepsilon, \quad (3)$$

$$I_n = \frac{\varepsilon}{R_n + r} \Rightarrow I_n R_n + I_n r = \varepsilon, \quad U_n + I_n r = \varepsilon. \quad (4)$$

Приравняем левые части уравнений (3) и (4):

$$U_m + I_m r = U_n + I_n r \Rightarrow r = \frac{U_m - U_n}{I_n - I_m}. \quad (5)$$

#### Описание экспериментальной установки

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Исследуемую солнечную батарею (СБ) рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы она была полностью равномерно освещена светом. Батарея освещается лампой 1; напряжение на лампе изменяется

с помощью ЛАТРа, подключенного к сети. С ростом напряжения увеличивается мощность лампы и освещенность  $E$  солнечной батареи (т.е. световой поток  $\Phi$ ); площадь светопоглощающего слоя батареи  $S = 0,16 \text{ м}^2$ . Освещенность определяется с помощью люксметра, укрепленного в центре батареи. В качестве нагрузки  $R$  используется магазин сопротивлений; падение напряжения на нагрузке измеряют вольтметром  $V$  с пределом измерения 20 В (постоянного тока). Гнезда вольтметра «com» и «V» соединяются соответственно с клеммами «0» и «max» магазина сопротивлений.

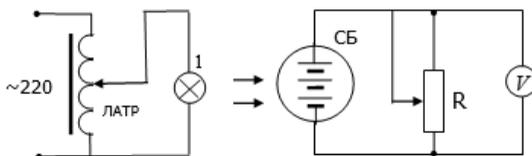


Рис. 1

### Порядок выполнения работы

1. Плоскость солнечной батареи (СБ) должна быть расположена вертикально.  
Установить лампу на расстоянии не менее  $\ell \approx 0,6 \text{ м}$  от СБ таким образом, чтобы свет падал перпендикулярно поверхности батареи, а центр лампы находился на одном горизонтальном уровне с центром батареи. При этом поверхность СБ освещается достаточно равномерно.  
Укрепить люксметр в центре СБ.
2. Подключить ЛАТР к сети, включить лампу.
3. Изменяя с помощью ЛАТРа напряжение на лампе (т.е. её мощность), с помощью люксметра установить освещенность солнечной батареи  $E$  по указанию преподавателя (рекомендуемые значения освещенности для СБ М30 1700 лк, 1300 лк, 1100 лк).
4. Вращением декадных рукояток установить на магазине сопротивлений первое нагрузочное сопротивление  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ; занести значение  $U$  (согласно показаниям вольтметра) в табл. 1. Увеличивая сопротивление  $R$  с шагом 200 Ом, заносить соответствующие значения  $R$  и  $U$  в табл. 1.
5. Выключить установку.

**Задание 1.** *Определение оптимального сопротивления нагрузки  $R_{\text{opt}}$ , максимальной мощности  $P_m$  и КПД.*

1. Рассчитать и записать в табл. 1 значения мощности  $P$ , соответствующие сопротивлению нагрузки  $R$  :

## Физика

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

2. Построить график зависимости  $P = f(R)$ .
3. По графику определить значения  $P_m$  и  $R_{opt}$ ; занести их в табл. 1.
4. Рассчитать КПД солнечной батареи:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi A} \cdot 100\% = \frac{P_m}{ESA} \cdot 100\%,$$

где  $S = 0,16 \text{ м}^2$ ;  $A = 0,0016 \text{ Вт/лм}$ .

Таблица 1

$E =$	лк,	$P_m =$	Вт,	$R_{opt} =$	Ом,	$\eta =$	%			
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, \text{Ом}$										
$U, \text{В}$										
$P, \text{Вт}$										

**Задание 2.** Определение фото-эдс и внутреннего сопротивления солнечной батареи.

1. Записать в табл. 2 шесть значений напряжения  $U$  из центральной части табл. 1.
2. Используя соответствующие значения  $R$  из табл. 1, рассчитать по формуле (1) значения тока  $I$ .
3. По указанию преподавателя выбрать сочетания  $m$  и  $n$  и записать их в табл. 2.
4. Для каждого сочетания  $m$  и  $n$  рассчитать по формуле (5) значения внутреннего сопротивления батареи, а затем по формуле (3) или (4) – значение фото-эдс.

Например,  $m = 1, n = 5, r = \frac{U_1 - U_5}{I_5 - I_1}, \varepsilon = U_5 + I_5 r$ .

5. Рассчитать  $\langle r \rangle, \langle \Delta r \rangle, \delta r, \langle \varepsilon \rangle, \langle \Delta \varepsilon \rangle, \delta \varepsilon$ .

Таблица 2

№	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$m, n$	$r, \text{Ом}$	$\Delta r, \text{Ом}$	$\delta r$	$\varepsilon, \text{В}$	$\Delta \varepsilon, \text{В}$	$\delta \varepsilon$
1						X			X
2									
3									
4									
5									
6									
Среднее значение									

6. Записать окончательный результат в виде:

$$\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle \pm \langle \Delta \varepsilon \rangle, \quad r = \langle r \rangle \pm \langle \Delta r \rangle.$$

7. Сравнить значения  $R_{омм}$  и  $\langle r \rangle$  из табл. 2:

$$\delta r_{теор} = \frac{|\langle r \rangle - R_{омм}|}{\langle r \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Сделать выводы о соответствии теории и эксперимента.

### Примечание

При исследовании СБ Р30 Е=2000 лк, 1300 лк, 1000 лк.

## Контрольные вопросы

1. Что представляет собой *p-n*-переход?
2. Объясните и проиллюстрируйте рисунком образование запиорного слоя *p-n*-перехода. Что представляют собой запиорный слой?
3. Что такое прямой ток *p-n*-перехода? Обратный?
4. Начертите вольтамперную характеристику *p-n*-перехода.
5. Что такое внутренний фотоэффект? Поясните механизм его возникновения с помощью рисунков.
6. Что такое фотопроводимость?
7. Что представляет собой красная граница фотопроводимости? Какой формулой она определяется для собственных и примесных полупроводников?
8. Что такое вентильный фотоэффект?
9. Что такое фото-эдс? Какие носители ее обеспечивают?
10. Движением каких носителей обусловлен фототок?
11. Как зависит фото-эдс от светового потока? Изобразите эту зависимость графически.
12. Что такое полупроводниковый фотоэлемент?
13. Что представляет собой солнечная батарея?
14. Изобразите вольтамперную характеристику солнечной батареи. Укажите на ней точки, соответствующие току короткого замыкания и фото-эдс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т.И.Трофимова, А.В. Фролов, «Курс физики», т.2, изд. КноРус, 976 с., 2010г.
2. А.В. Глазачев, В.П. Петрович «Физические основы электроники», Томск, 2015г. Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/6224448/>.